

Estudio Hidráulico de la inundabilidad del Principado de Andorra

Hans Sánchez, Manuel Gómez, Ernest Blade

FLUMEN – UPC. E.T.S. Ing. de Caminos. Jordi Girona 1-3. 08034 Barcelona

hans.sanchez@upc.edu

Manel Riera, Xavier Planas, Valérie Subra

*Ministeri d' Ordenament Territorial, Urbanisme i Medi Ambient. Camí de la Grau s/n
AD500 Andorra la Vella*

Jordi Amigó

EuroGeotécnica, Avda. Corts Catalanes 5-7, 2ª Pl. 08173 Sant Cugat del Vallès

1 Introducción

El Principado de Andorra, debido a la ubicación de sus principales núcleos habitados a orillas del río Vallira, viene sufriendo inundaciones que provocan desde simples molestias a la población hasta serios problemas tanto económicos como personales. Las autoridades, preocupadas por este problema y previendo posibles desastres como se tiene constancia de algunos episodios en años anteriores, ha ido poniendo en marcha una serie de actuaciones de mejora de la capacidad de desagüe del río Valira, en varios tramos. Estas obras si bien es cierto han mejorado la protección frente al riesgo de inundación de parte de algunos centros urbanos, no se han extendido a todo el cauce y se desconoce el estado del conjunto de las zonas inundables del Principado. En vista de eso, a partir del año 2006 el gobierno de Andorra encargó el análisis de riesgo de inundación de toda la cuenca del río Valira correspondiente al Principado de Andorra, con la finalidad de evaluar la amplitud de las zonas inundables, los niveles de riesgo y la fuerza de arrastre de material sólido en el río. Se puso un especial énfasis en los núcleos urbanos dada la peculiar morfología fluvial, en donde la llanura de inundación es casi siempre zona urbana. También se han propuesto alternativas de solución para mitigar la inundación de las zonas urbanas, se ha simulado el comportamiento del río incluyendo las alternativas propuestas, para verificar su efectividad para caudales de un periodo de retorno de 100 años.

2 Información base

2.1 Información topográfica

Con la finalidad de realizar una modelación hidráulica con la mayor precisión posible se ha utilizado una base topográfica hecha a partir de vuelos lidar con una nube de puntos cuya resolución final se requería fuera de medio metro y una precisión de 5 cm tanto en altitud como en distancia, en todas las zonas de inundación. La utilización de este detalle viene dada por la necesidad de estudiar con mucha precisión la zona urbana que se ve afectada por posibles desbordamientos del río. Se precisaba llegar al detalle de modelar la circulación del agua por las calles y áreas urbanas para acotar las condiciones de riesgo para el peatón en caso de un desbordamiento del río y zonificar de acuerdo a los criterios de vulnerabilidad o riesgo establecidos, permitiendo definir medidas de solución estructural o en caso contrario tomar medidas alternativas de previsión de desastres.

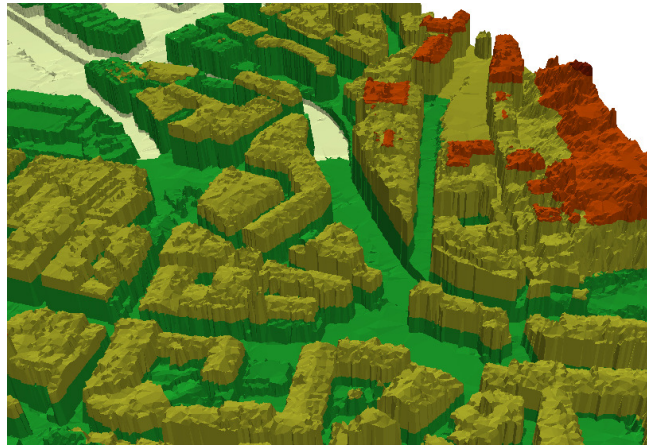


Figura 1 Modelo digital de elevación de la zona de estudio a partir de los vuelos lidar

La información topográfica, ha sido procesada adecuadamente hasta obtener una malla de triángulos, de manera que cada uno de los triángulos será una superficie de cálculo. El número de superficies depende de la irregularidad del terreno, siendo muchas más en zonas urbanas que en zonas rurales. En zonas rurales se han utilizado como media 10.000 elementos por kilómetro lineal de río estudiado mientras que en zonas urbanas el número de elementos llegaba a los 60.000 por kilómetro lineal de río estudiado.

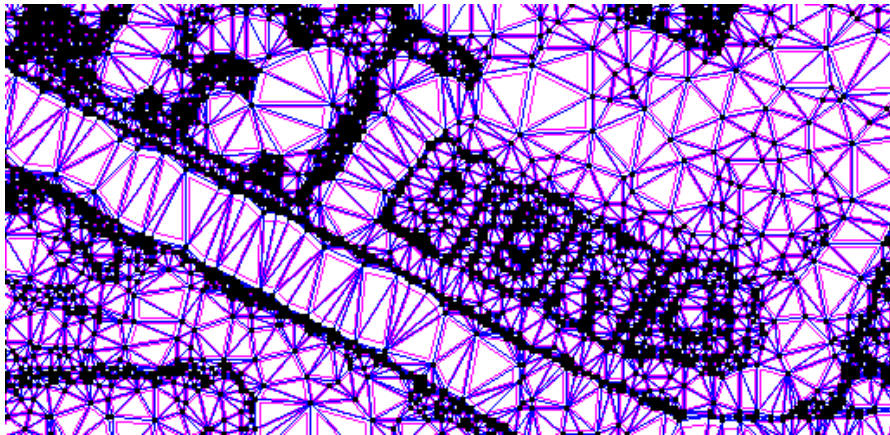


Figura 2 Malla de triángulos para la modelación numérica

2.2 Información hidrológica

Previamente se realizó un modelo hidrológico de las cuencas del Valira, para un periodo de retorno de 100 años, mediante modelo HEC-HMS, calibrando el comportamiento de la cuenca con los datos de registro de la estación de aforo de la Seu d'Urgell y con las precipitaciones correspondientes de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca de Andorra: Central, Engolasters y Ransol, de tal manera que las precipitaciones más importantes registradas produzcan los mismos hidrogramas que se han medido en la Seu. La calibración se ha realizado modificando el número de curva dentro de la cuenca, y finalmente se han validado los resultados con otras lluvias. De esta manera podemos estar seguros que el modelo hidrológico nos darán resultados bastantes cercanos a la realidad, ya que el número de curva no ha sido estimado solamente por tablas sino ha sido calculado con información real.

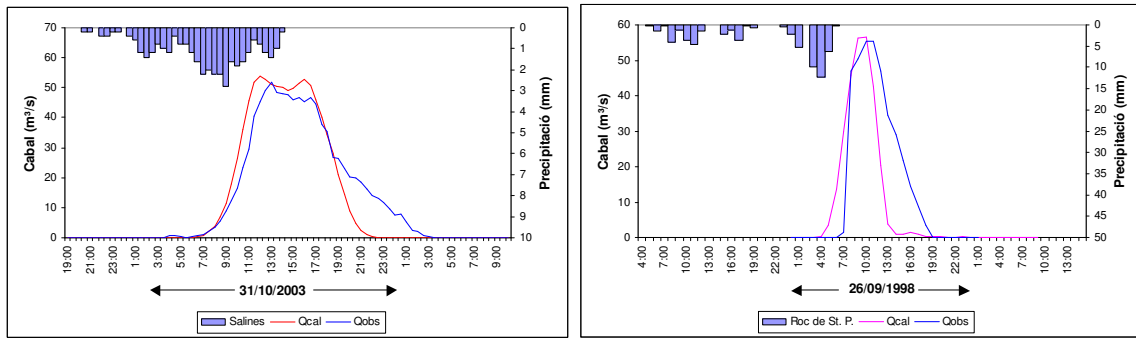


Figura 3 Calibración del número de curva en la cuenca con precipitación importantes

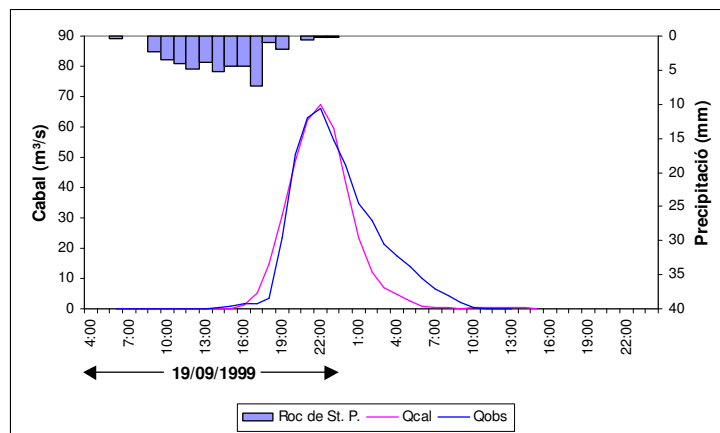


Figura 4 Validación del número de curva con una precipitación que no ha sido estudiada

3 Modelación numérica del río Valira

El modelo numérico utilizado para el análisis hidráulico ha sido el CARPA (Bladé, 2005) (Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas), modelo creado en la Universidad Politécnica de Cataluña por el grupo de investigación FLUMEN. Este modelo utiliza volúmenes finitos, y permite simular flujos en 1D y 2D en el mismo cálculo. CARPA resuelve las ecuaciones de Saint Venant en nuestro caso bidimensional en la zona de estudio discretizada por una malla de cálculo irregular y no estructurada.

En base a los tamaños de los elementos de cálculo considerados como polígonos, en nuestro caso se ha trabajado con triángulos de diferentes tamaños, según la topografía. Se ha optimizado el proceso de cálculo, sobre todo en las fases de secado y mojado de la zona de estudio, para reducir el tiempo de cálculo.

Como condición de contorno de aguas arriba se ha introducido el hidrograma de entrada y la velocidad de flujo y como condición de contorno aguas abajo se ha considerado salida tipo vertedero. La evaluación final de las condiciones de contorno se ha hecho mediante un análisis de sensibilidad, hasta encontrar la condición de contorno más adecuada de tal manera que no influya en los resultados obtenidos.

La gestión de la información topográfica y coeficientes de rugosidad para preparar las mallas de cálculo, así como la asignación de las condiciones iniciales, condiciones de contorno y demás parámetros se ha realizado mediante el programa GID (www.gidhome.com) desarrollado por el CIMNE (Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria). GID nos ha servido como un interfaz para el preproceso de datos y el postproceso de resultados, es decir la visualización de resultados.

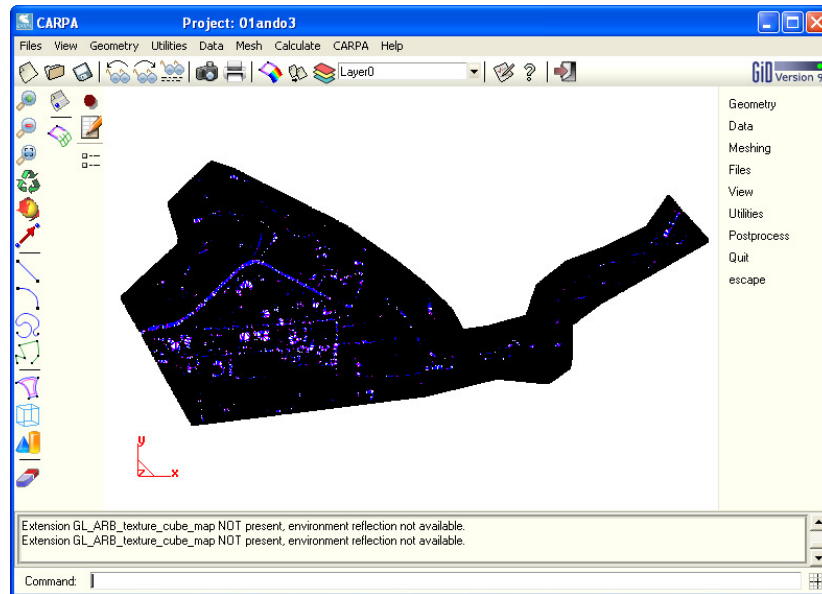


Figura 5 Generación de la malla de cálculo con el programa GID

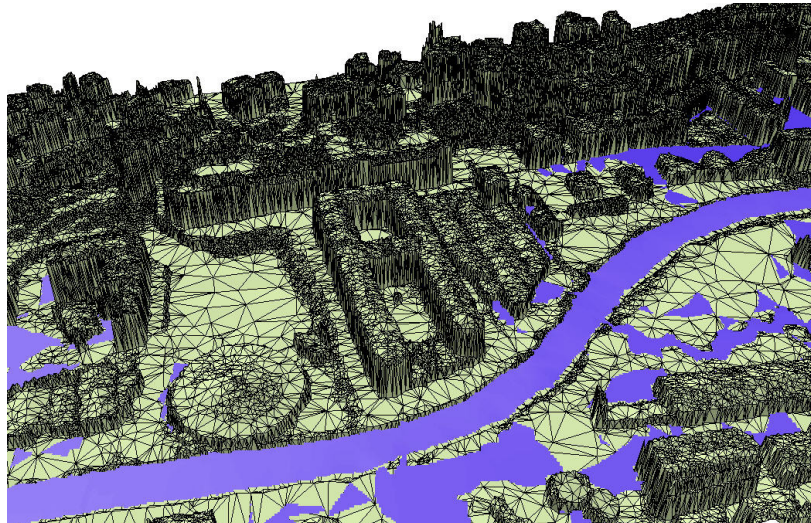


Figura 6 Mallas para el cálculo hidráulico con el modelo CARPA

4 Resultados obtenidos

Como resultado del cálculo, CARPA evalúa en cada punto del cauce y de la zona inundable los valores de calado y las componentes de velocidad en los ejes x e y en cada instante de cálculo. Analizando los valores en cada polígono, podemos a su vez obtener los máximos del calado, de la cota del nivel de agua y de la velocidad del agua en dicho punto. Los resultados más importantes son los asociados a la llanura de inundación, en particular las zonas urbanas. El modelo de elevaciones nos permite definir con suficiente precisión las secciones transversales de las calles por donde discurre el flujo, los edificios que quedarán como islas dentro de la zona de estudio, y así poder clasificar según criterios de riesgo la zona inundable.

4.1 Modelo digital de calados

Con la información de calados, se ha obtenido un modelo digital de calados, que nos permite conocer en cada punto del cauce y la llanura de inundación el calado máximo, cuyos resultados se presentan cada medio metro.

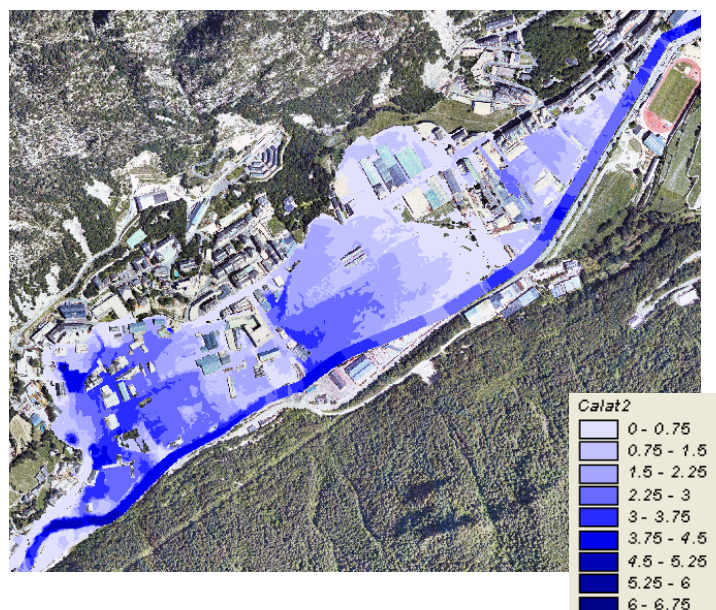


Figura 7 Modelo digital de calados. Escala en metros

Con los calados, se determinará la zonificación según los criterios de riegos, también se podrá obtener la acción hidrodinámica del río.

4.2 Modelo digital de velocidades

Con la información de velocidades máximas, se ha obtenido un modelo digital de velocidades, que nos da la información de velocidad máxima que pasa en cada punto. Gracias a esta información más se podrá zonificar según los criterios de riesgo.

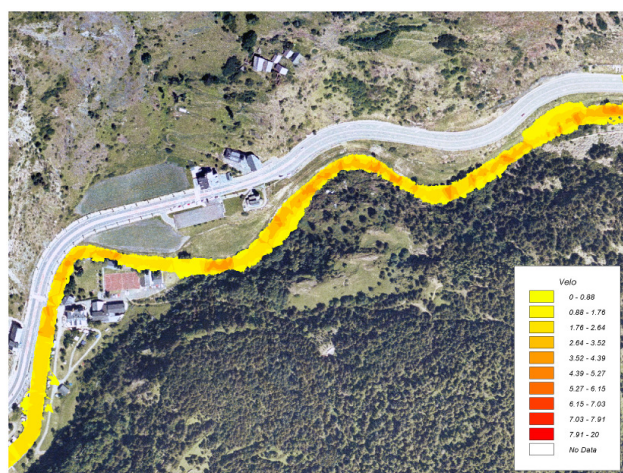


Figura 8 Modelo digital de velocidades

4.3 Mapa de criterios de riesgo

Para calcular el mapa de criterios de riesgo se han aplicado los criterios de riesgo para la zonificación recogidos en Corestein (2004), los mismos aplicados por ejemplo por la Agencia Catalana del Agua para los estudios de inundabilidad. Dada la proximidad geográfica, se han adoptado esos criterios. Zonifica de acuerdo al calado la velocidad y el producto de velocidad por calado. Se distinguen 3 zonas de riesgo: riesgo alto, moderado y bajo.

Riesgo alto es toda zona cuyo calado es mayor que un metro o la velocidad es mayor que 1 m/s o el producto de la velocidad por el calado es mayor de 0.5 m²/s. Riesgo moderado es la zona cuyo calado está comprendido entre 0.4 y 1 metro o la velocidad fluctúa entre 0.4 y 1 m/s o el producto de la velocidad por el calado este entre 0.08 y 0.5 m²/s. Finalmente Riesgo bajo, es la zona cuyo calado es menor de 0.4 metros o la velocidad es menor de 0.4 m/s o el producto de la velocidad por el calado es menor de 0.08 m²/s.



Figura 9 Mapa de criterios de riesgo

4.4 Mapa de acción hidrodinámica

La Acción hidrodinámica del río sobre el material sólido se determina a través de la fuerza de arrastre, y para ello hemos empleado el criterio de Shields

$$\tau = \frac{\gamma \cdot R_h \cdot I}{(\gamma_s - \gamma) \cdot D} = 0.056$$

A través de esta fórmula se ha podido determinar en cada punto del río el diámetro del sedimento que teóricamente puede arrastrar. Con esta información se ha elaborado un modelo digital de acción hidrodinámica del río Valira, zonificando el cauce de acuerdo a la capacidad de arrastre que tenga. A partir de esto, y cruzado con el inventario de material existente en laderas y zonas anejas susceptible de alcanzar la zona del cauce, se plantea un programa de retención de material sólido en las laderas de montaña para prevenir su llegada al cauce y evitar los efectos de bloqueo que pudieran producir sobre el flujo.

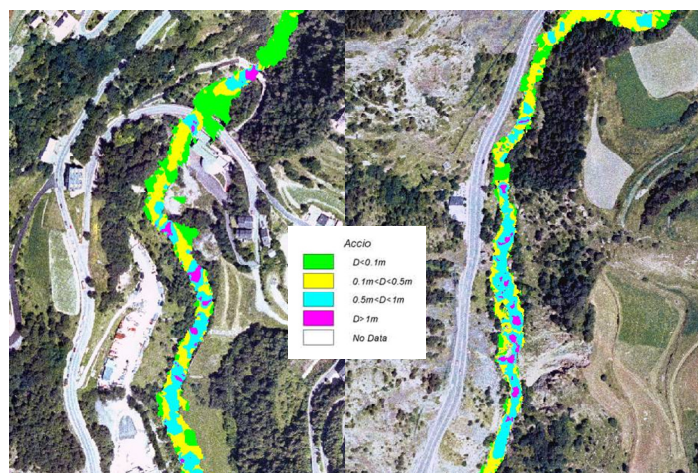


Figura 10 Mapa de acción hidrodinámica

Esta información se puede utilizar para evaluar la degradación del río producto del incremento de la escorrentía debido a la acelerada urbanización que está sufriendo esta cuenca y tener conocimiento de la fuerza de arrastre del río cuando se pretenda recuperar los espacios fluviales.

5 Presentación de la información

Los resultados obtenidos se pueden visualizar y gestionar desde el programa GID, o desde cualquier programa de gestión de sistemas de información geográfica, tipo ArcView, ArcGIS, Miramon u otro, porque están guardados en formato grid Ascii, con una resolución de celdas de medio metro de lado.

Debido a que para la utilización de estos programas se necesita tener instalados alguno de los programas de gestión de SIG y saber utilizarlos, algo que de momento no está al alcance de la mayoría de los usuarios, hemos decidido hacer una integración de los resultados con GoogleMap, de tal manera que puedan ser gestionados por cualquier persona que tenga un ordenador conectado a Internet. El ordenador puede tener cualquier sistema operativo o incluso ser de uso eventual y estar ubicado en cualquier punto del planeta. Solo necesita entrar a una página web donde está alojado el servidor. En la página web mediante un esquema sencillo de botones activados por el usuario, éste puede seleccionar el tipo de información que desee ver, los calados, la velocidad, la acción hidrodinámica, el mapa de riesgos o no ver ninguna capa. Y todo sobre GoogleMap que conserva sus características propias de zoom, cambiar de fondo observando bien sea la foto satelital, el mapa, el relieve de la zona o una visión combinada de alguno de los anteriores. De esa forma la administración andorrana podría consultar desde cualquier terminal conectada a Internet, la situación desde el punto de vista de riesgo de cualquier parcela del territorio.

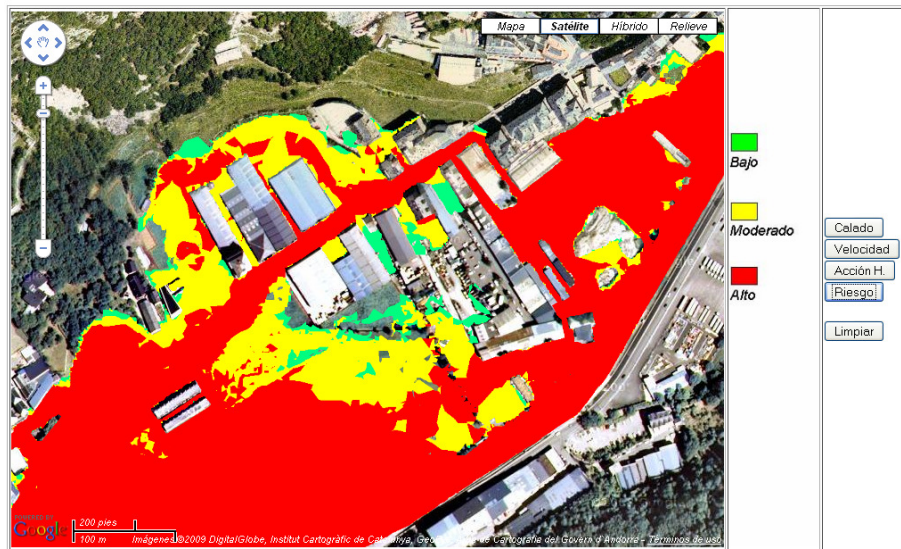


Figura 11 Integración de resultados con GoogleMap

6 Conclusiones

En el estudio de inundabilidad del Principado de Andorra, se ha utilizado un modelo digital de elevaciones de muy alta resolución, de las mayores empleadas hasta el momento en este tipo de estudios. A partir de la misma, se ha estudiado con un modelo de simulación 1D/2D combinado, el flujo de detalle en las llanuras de inundación del Valira que en realidad son las zonas urbanas del principado. La zona urbana se ha modelado de modo que se reproducen las secciones transversales de las calles, plazas y otros espacios abiertos con la mejor resolución posible. La zonificación obtenida del estudio permitirá a las autoridades andorranas proponer las medidas pertinentes de protección así como la zonificación de usos del suelo en aquellas zonas sensibles a la inundación. Se han propuesto soluciones en la línea de ampliar el encauzamiento actual del Valira en un cierto tramo, y la rectificación local de ciertas zonas de cauce en curva para mejorar puntualmente la capacidad de desagüe.

Finalmente se ha conseguido presentar los resultados de una forma fácil y clara y sobre todo que esté al alcance de cualquier usuario y en cualquier lugar prácticamente, sin la necesidad de que tengan el conocimiento de programas de gestión de sistemas de información geográfica ni tengan la licencia de estos programas.

7 Bibliografía

Bladé, E. (2005) Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. Tesis doctoral. ETSECCPB Diciembre.

Bladé, E., Gómez-Valentín, M. (2006). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones. Monografía CIMNE N° 97. Barcelona.

Corestein, G, Bladé, E, Gómez, M, Dolz, J. Oñate, E, Piazzese, J. (2004) New GiD Interface for Ramflood-DSS Project Hydraulic Simulation Code. 2nd Conference on Advances and Applications of GiD..CIMNE. Barcelona.